افزایش مقاومت به سایش زیرلایهٔ مسی پوشش‌داده‌شده با نانوکامپوزیت مس‌آلومینا به‌روش احتراق محلولی*

مقاله پژوهشی

هادی نصیری[(۱)] احسان محمدی[(۲)]

چکیده

یکی از روش‌های نوین برای سنتز سریع و کم‌هزینهٔ نانومواد، سنتز احتراقی در محلول است. در کار ارائه شده از نیترات‌های مس و آلومینیم با نقش اکسیدکنندگی و از اوره به‌عنوان سوخت و از گرافیت نیز برای مادهٔ کمکی استفاده شد. آزمایش‌ها در ۵درصد وزنی مختلف فاز آلومینا (۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ۴۵) با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ انجام شد و نمودارهای دما برحسب زمان در حین انجام سنتز رسم شد و میزان مقاومت به سایش نمونه‌ها مطالعه شد. نتایج نشان داد در نسبت ۲۵درصد وزنی فاز آلومینا میزان مقاومت به سایش زیرلایهٔ مسی پوشش‌داده شده تا حدود ۴برابر افزایش یافت. همچنین میکروساختار و فازهای تشکیل شده این پوشش با میکروسکوپ‌های SEM مجهز به EDS، TEM و آنالیز XRD بررسی شد که نتایج تولید پوشش نانوکامپوزیتی مس‌آلومینا را در یک مرحله در اتمسفر هوا تأیید کرد.

واژه‌های کلیدی نانوکامپوزیت مس‌آلومینا، احتراق محلولی، مقاومت به سایش، دمای احتراق.

The Increase in the Wear Resistance of Copper Substrate Coated by Cu-Al_2O_3 Nanocomposite Through Solution Combustion Method

H. Nasiri E. Mohammadi

Abstract

Solution Combustion is a new and low costs method in order to synthesis nanomaterials. In the presented investigation, Copper and Aluminum nitrates, Urea and Graphite are used as oxidizer, fuel and auxiliary materials, respectively. All experiments categorized in five groups in terms of percentage of alumina (5, 15, 25, 35 and 45 wt. %) and fuel to oxidizer ratio of 1.25. Time- Temperature diagrams are plotted during reaction and wear tests carried out for all samples. Results showed, sample with 25 wt. % alumina can increase the wear resistance 4 times than non-coated copper substrate. Also, the coating microstructure were investigated by SEM equipped by EDS, TEM and XRD. The results proved synthesis of nanocomposite copper-alumina coating just in one-step.

Key Words Copper-Alumina Nanocomposite, Solution Combustion, Wear Resistance, Combustion Temperature.

---

* تاریخ دریافت مقاله ۹۷/۱۰/۲۵ و تاریخ پذیرش آن ۹۸/۳/۲۵ می‌باشد.

(۱)نویسنده مسئول: استادیار، گروه مهندسی مواد، دانشکده مهندسی مکانیک و مواد، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران.

Email: nasiri@birjandut.ac.ir

(۲) کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

DOI: 10.22067/jmme.2021.58568.0

مقدمه

مس دارای کاربردهای فراوانی در ساخت قطعات مهندسی است. از مهم‌ترین علل محدودکننده آن پایین‌بودن خواص مکانیکی در سطح آن مانند مقاومت به سایش و سختی است. استفاده از پوشش‌های نانوکامپوزیتی راهی مناسب برای رفع این عیب و از طرفی حفظ خواص ذاتی مس است. استفاده از ذرات سرامیکی در نقش فاز تقویت‌کننده مانند SiC ،TiO_2 وAl_2O_3 در میان فاز زمینهٔ مسی از مهم‌ترین این پوشش‌هاست. آلومینا به‌دلیل ارزان بودن و پایداری در دماهای بالا و برخورداری از استحکام مناسب ماده‌ای مطلوب در نقش فاز تقویت‌کننده است [2-1].

روش‌های فراوانی در علم مهندسی سطح برای تولید این پوشش‌های نانوکامپوزیتی موجود است؛ از مهم‌ترین آن‌ها می‌توان از صنعت آبکاری، پوشش‌های پاششی، سل‌ژل، رسوب هم‌زمان و آسیاب‌کاری نام برد. معایبی در روش‌های ذکرشده موجود است که استفاده از آن‌ها را محدود می‌کند؛ از مهم‌ترین عوامل می‌توان به کنترل سخت فرایند پوشش، هزینه‌بربودن، زمان‌بربودن، نیاز به تکنولوژی پیچیده و عملیات‌های تکمیلی این روش‌ها اشاره کرد. بنابراین تولید روش‌های جدید با راندمان بالا و هزینه پایین ذهن بسیاری از پژوهشگران علاقه‌مند در این زمینه را به خود مشغول کرده است [7-3]. روش سنتز احتراقی در محلول ترکیبی از احتراق و محلول واکنش‌پذیر است. معمولا سنتز احتراقی در محلول شامل واکنش خودپیش‌رونده در یک محلول از نیترات فلزات و سوخت‌های مختلف است که ممکن است براساس نحوهٔ انجام سنتز دسته‌بندی شود. بعد از پیش‌حرارت‌دهی تا دماهای مطلوب (۱۵۰ تا ٤۰۰درجه سانتی‌گراد)، شعله خودبه‌خود تمام حجم را دربرمی‌گیرد (حالت حجمی) و به تشکیل محصولات جامد ریز با ترکیب مناسب و همگن منجر می‌شود. ابتدا محیط واکنش اولیه در یک حالت مایع قرار می‌گیرد تا امکان مخلوط‌شدن در سطح مولکولی را فراهم کند. بدین‌ترتیب اجازه می‌دهد محصول به‌صورت دقیق و فرمول‌بندی یکنواخت ترکیبات و در مقیاس نانو سنتز شود. دوم، دمای واکنش بالا باعث اطمینان از خلوص و کریستاله‌بودن محصول می‌شود. این خصوصیات باعث می‌شود نیاز به مراحل اضافی برطرف شود؛ یعنی کلسینه محصول در دمای بالا که به‌صورت متعارف در روشی همانند سل‌ژل مورد نیاز است تا محصول به ترکیب مناسب و کریستاله برسد. سوم، زمان کوتاه فرایند و تشکیل میزان بالایی از گازها در حین انجام واکنش از رشد اندازهٔ ذرات ممانعت می‌کند و شرایط را برای تولید پودرهای نانواندازه با مساحت سطح ویژه بالا مطلوب می‌کند. تمام خصوصیاتی که در بالا برای فرایند سنتز احتراقی در محلول بیان شد، برای کاربردهای متنوعی از جمله کاتالیست‌ها، سلول‌های سوختی و بیولوژی مطلوب است [3,8]. اصول سنتز نانومواد به این روش مبتنی بر واکنش‌های اکسایش‌احیایی است که بین نیترات فلزات و سوخت‌ها رخ می‌دهد. گرمای آزادشده بر اثر این واکنش‌ها نیاز به منبع حرارتی خارجی برای ادامه واکنش را از بین می‌برد [11-9].

سوخت‌هایی که تاکنون برای فرایند سنتز احتراقی مصرف شده‌اند، عبارت‌اند از: اوره، گلایسین، CH ،ODH، TFTA ،DFH و... . با به‌کاربردن این سوخت‌ها تعداد زیادی از اکسیدهای فلزات تاکنون سنتز یافته‌اند. به‌استثنای اوره و گلایسین، اغلب سوخت‌های دیگر استفاده‌شده در فرایند سنتز احتراقی در محلول از مشتقات هیدرازین هستند که به‌وسیلهٔ هیدرات هیدرازین تهیه می‌شوند، که سرطان‌زا هستند [2].

در این تحقیق برای اولین‌بار از روش سنتز احتراقی در محلول برای تولید پوشش‌های نانوکامپوزیتی مس‌آلومینا با بالاترین مقدار مقاومت به سایشی ممکن استفاده شده است. علاوه بر این تلاش شده است پوشش مدنظر در یک مرحله و در اتمسفر هوا روی زیرلایهٔ مسی اعمال شود.

جدول ١ ضرایب مربوط به رابطهٔ (١) برای تولید پوشش با درصدهای وزنی متفاوت فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا

آلومینا	a	b	c	d	e	f	g	h
٥	٢	٣٠/٣	٦٥/٥	٣٠/٣	١	٦٥/٥	١٣١	٩٧/٣
١٥	٢	٩	٢٣	٩	١	٢٣	٤٦	٣٣/٥
٢٥	٢	٤/٨	١٤/٦	٤/٨	١	١٤/٦	٢٩/٢	٢٢/٤
٣٥	٢	٣	١١	٣	١	١١	٢٢	١٧
٤٥	٢	١/٩	٨/٩	١/٩	١	٨/٩	١٧	١٣/٨

مواد و روش تحقیق

آماده‌سازی محلول

در این پژوهش از نیترات مس، نیترات آلومینیم به‌عنوان اکسید کننده‌ها و از اوره نیز به‌عنوان سوخت برای تولید پوشش نانوکامپوزیتی مس‌آلومینا استفاده شد، به‌طوری‌که مس در نقش زمینه و آلومینا در نقش فاز تقویت‌کننده باشند. از گرافیت نیز به‌عنوان مادهٔ کمکی برای جلوگیری از اکسیداسیون مس فلزی سنتزشده در اتمسفر هوا استفاده شد [12] گرافیت با نیترات‌های مس و آلومینیم و اوره قبل از اضافه‌کردن آب‌مقطر مخلوط شد. در حین حرارت‌دهی، محلول همواره درحال هم‌زده‌شدن با مگنت با سرعت ١٤٠دور بر دقیقه بود. محاسبهٔ نیترات مس و نیترات آلومینیم برای سنتز محصولی حاوی ٥، ١٥، ٢٥، ٣٥ و ٤٥درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا طبق معادلهٔ (١) محاسبه شد. در جدول (١) ضرایب استوکیومتری رابطهٔ (١) برای تولید پوششی با نسبت‌های متفاوت فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا نشان داده شده است.

$$aAl(NO_3)_3 + bCu(NO_3)_2 + cCO(NH_2)_2 = dCu + eAl_2O_3 + fCO_2 + gH_2O + hN_2 \quad (١)$$

میزان گرافیت اضافه‌شده براساس رابطهٔ (٢) محاسبه شد.

$$CuO+C=Cu+CO \quad (٢)$$

استفاده از ٢٥درصد میزان استوکیومتری گرافیت به‌عنوان بهینه‌ترین مقدار آن براساس آزمایش‌ها در نظر گرفته شد [12]. در این حالت گرافیت باقی‌مانده در محصول نهایی وجود نخواهد داشت. محاسبهٔ نسبت سوخت به اکسیدکننده برگرفته از روش آقای جین و همکارانش بوده است [13]. مواد اولیهٔ آماده‌شده در حداقل مقدار آب‌مقطر (٢سی‌سی) حل شدند

آماده‌سازی زیرلایهٔ مسی

زیرلایهٔ مسی در ابعاد ١٠×١٠×٣میلی‌متر برش داده شد. قطعات بعد از دستیابی به ابعاد مدنظر با کاغذ سمباده حاوی SiC پولیش داده شدند. برای چربی‌زدایی و زدودن هرگونه آلودگی زیرلایه‌های مسی، در ابتدا با آب‌مقطر و صابون شست‌وشو داده شدند و سپس ١٠دقیقه در بشر حاوی استون در حمام اولتراسونیک شست‌وشوی نهایی شدند.

فرایند پوشش‌دهی

محلول حاوی مواد اولیه روی هات‌پلت با دمای ٣٠٠درجه سانتی‌گراد قرار می‌گیرد. زیرلایهٔ مسی درون ظرف حاوی محلول گذاشته می‌شود، پس از تبخیر آب و تشکیل ژل، احتراق بعد از حدود ٤دقیقه با سرعت و به‌صورت حجمی و ناگهانی انجام می‌شود و پوشش روی زیرلایه می‌نشیند. از ابزار Data Acquzation مدل Advantech USB4718 برای ترسیم نمودار دمازمان و تحلیل رفتار دمایی نمونه‌ها از زمانی که محلول روی هات‌پلت گذاشته می‌شود تا زمانی که سنتز انجام شود و نمونهٔ پوشش‌داده‌شده به دمای محیط برسد، استفاده شد. این دستگاه از طریق کابل USB به کامپیوتر متصل می‌شود و به‌وسیلهٔ یک سیم ترموکوپل نوع K به

محلول متصل می‌شود. این دستگاه قادر است تا ۱۰داده دمایی را در هر ثانیه از محیط واکنش به کامپیوتر منتقل و منحنی‌های دمازمان را رسم کند.

آزمون‌ها

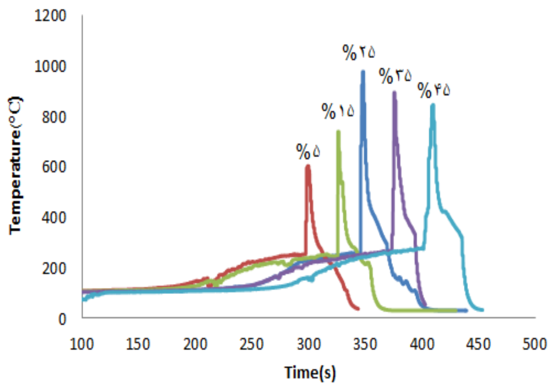
از دستگاه آزمون سایش ساخته‌شده در آزمایشگاه طبق روش Pin On Disk آزمون سایش انجام شد. نرخ سایش گزارش‌شده از تقسیم اختلاف جرم بر مصافت طی‌شده حین سایش ۵۰متر به‌دست می‌آید. این آزمون برای بررسی اثر مقدار درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا بر مقاومت به سایش پوشش ایجادشده انجام گرفت. این آزمون با درصدهای وزنی مختلف فاز تقویت‌کننده آلومینای محاسبه‌شده طبق معادلهٔ (۱)، ۵، ۱۵، ۲۵، ۳۵ و ٤۵درصد با نسبت سوخت به اکسیدکنندهٔ ۱/۲۵ انجام شد. برای تعیین فازهای تشکیل‌شده، آزمایش XRD روی نمونه‌ها انجام شد. برای این آزمون دستگاه (Philips X`pert) با طیف K_α مس با طول موج λ=0.15406 nm گام ° ۰/۰۲، سرعت اسکن نیم تا یک درجه بر دقیقه و از زاویهٔ ۹۰-٤ بررسی شد.

میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) مدل VP1450 محصول کمپانی LEO-Germany برای بررسی ساختار و مورفولوژی پوشش ایجادشده استفاده شد. میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) مدل CM120 محصول کمپانی Philips برای بررسی نانوذرات آلومینا استفاده شد.

پوشش تشکیل‌شده روی زیرلایهٔ مسی با محلول واکنشی با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ از سطح زیرلایهٔ تراشیده شد و در حلال شامل اسیدنیتریک و آب‌مقطر با نسبت ۱-۱ روی همزن مغناطیسی به‌مدت نیم‌ساعت در دمای محیط قرار گرفت تا مس موجود حل شود. پس از حل‌شدن مس موجود محلول به‌دست‌آمده از کاغذ صافی عبور داده می‌شود. محصول باقی‌مانده روی کاغذ صافی یک ساعت در آون در دمای ۷۰درجه سانتی‌گراد قرار گرفت. سپس برای آنالیز TEM فرستاده شد.

نتایج و بحث

برای بررسی مقاومت به سایش پوشش ایجادشده در نسبت‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده، پوشش‌دهی در نسبت‌های ۵ ، ۱۵ ، ۲۵ ، ۳۵ و ٤۵درصد وزنی فاز آلومینا با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ انجام شد. برای درک بهتر رفتار سایشی نمونه‌های پوشش‌داده‌شده با درصدهای متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا، ابتدا رفتار دمایی حین سنتز بررسی می‌شود. شکل (۱) منحنی دمازمان پوشش‌های تشکیل‌شده با نسبت‌های متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا را نشان می‌دهد.

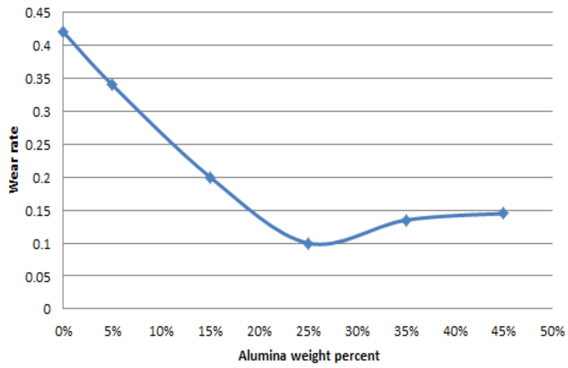


شکل ۱ منحنی‌های دما برحسب زمان در نسبت‌های مختلف فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا

همان‌طور که در منحنی‌های شکل (۱) نشان داده شده، مشخص است با افزایش آلومینا از ۵ تا ٤۵درصد دمای احتراق واکنش از حداقل مقدار ٦۰۰°C برای نمونه با ۵درصد وزنی آلومینا تا دمای ۹۷٦ °C برای نمونه با ۲۵درصد وزنی آلومینا افزایش می‌یابد. واکنش‌های اکسایش و احیای پی‌درپی در زمان بسیار کوتاه (حدود ۲ تا ۳ثانیه) سبب افزایش دمای احتراق واکنش در سیستم سه‌تایی نیترات مس، نیترات آلومینیم و اوره به دماهای بالای ۹۰۰°C می‌شود [14]. همان‌طور که در شکل (۱) نشان داده شده است، میزان دمای احتراق روندی افزایشی تا ۲۵ درصد وزنی فاز آلومینا از خود نشان می‌دهد. از طرفی دیگر با افزایش مقدار نیترات آلومینیم مصرفی برای تولید آلومینای بیشتر از ۲۵درصد وزنی در محصول، مقدار نیترات مس در محلول کاهش می‌یابد به‌طوری‌که کاسته‌شدن نیترات مس سبب می‌شود این اکسیدکننده توان فراهم‌کردن حرارت مورد نیاز برای واکنش نیترات آلومینیم و اوره را نداشته باشد، زیرا در ابتدا واکنش

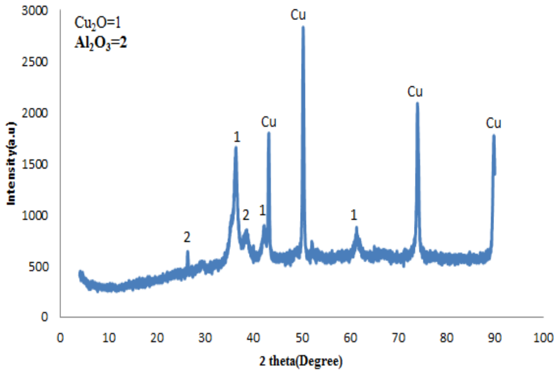
بین نیترات مس و اوره شروع می‌شود و حرارت آزادشده به‌وسیلهٔ آن سیستم واکنشی نیترات آلومینیم و اوره را فعال می‌کند. به‌این‌ترتیب دمای احتراق محلول در نسبت‌های بیشتر از ۲۵ درصد کاهش می‌یابد.

پس از بررسی رفتار دمایی پوشش ایجادشده با نسبت‌های متفاوت آلومینا، رفتار سایشی نمونه‌های پوشش‌داده‌شده با درصدهای متفاوت فاز آلومینا مطالعه شد. مقادیر نرخ سایش برحسب درصدهای متفاوت فاز تقویت‌کننده آلومینا در شکل (۲) نشان داده شده است.



شکل ۲ منحنی تغییرات نرخ سایش با درصدهای وزنی مختلف فاز تقویت‌کننده آلومینا

همان‌طور که در منحنی نرخ سایش شکل (۲) نشان داده شده است، با افزایش درصد فاز آلومینا از ۵ تا ۲۵درصد وزنی مقاومت به سایش نیز افزایش یافته است که به‌دلیل افزایش دمای احتراق در محلول و در نتیجه افزایش چسبندگی بین پوشش و زیرلایه است. به بیان دیگر، افزایش دما سبب برقراری پیوند محکم‌تری بین فاز تقویت‌کننده، زمینه و زیرلایه می‌شود. همچنین در دمای بالاتر از ۹۰۰ درجه سلسیوس فاز گاما آلومینا به آلفا تبدیل می‌شود که این مسئله نیز باعث افزایش بیشتر مقاومت به سایش می‌شود [15]. با افزایش بیشتر فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا از ۲۵ تا ٤٥درصد وزنی، دمای احتراق کاهش پیدا می‌کند و در نتیجه از چسبندگی پیوند ذرات آلومینا با زمینه کاسته می‌شود و به‌تبع آن مقاومت به سایش کاهش پیدا می‌کند. باتوجه به نتایج، بهترین خواص سایشی پوشش‌های تولیدی در ۲۵درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا به‌دست آمده است، بنابراین با بررسی رفتار سایشی و ریزساختار، فازهای تشکیل‌شده در این مقدار فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا انجام گرفت. شکل (۳) الگوی XRD مربوط به نمونهٔ پوشش‌داده‌شده روی زیرلایهٔ مسی با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵ و استفاده از ۲۵درصد وزنی میزان استوکیومتری گرافیت را نشان می‌دهد.

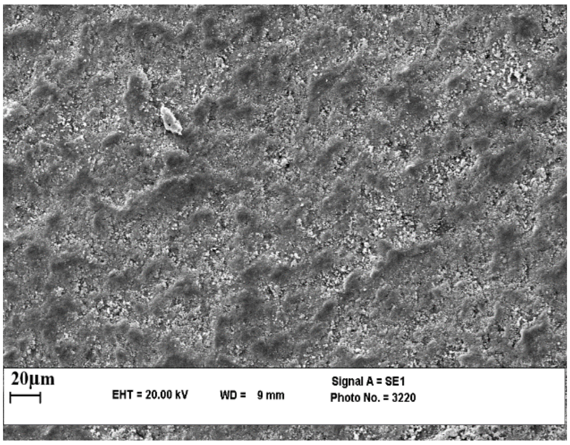


شکل ۳ الگوی تفرق اشعهٔ ایکس برای نمونهٔ پوشش‌داده‌شده با نسبت سوخت به اکسیدکنندهٔ ۱/۲۵ و استفاده از ۲۵درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا

شکل (۳) تشکیل فازهای مس و آلومینا را نشان می‌دهد. حضور ترکیبات احیاکننده در سوخت سبب انجام واکنش‌های اکسایش‌کاهش حین سنتز می‌شود. از طرفی دیگر حضور گرافیت در محلول مانع از اکسیداسیون مس سنتزشده در اتمسفر هوا می‌شود [16]. شکل (٤) میکروساختار از پوشش تشکیل‌شده در نسبت ۱/۲۵ سوخت به اکسیدکننده و استفاده از ۲۵ درصد میزان استوکیومتری گرافیت را نشان می‌دهد.

از خصوصیات سنتز احتراقی در محلول، تشکیل گازهای فراوان در حین احتراق است [8]. نیترات مس، نیترات آلومینیم و اوره موجود در محلول طبق واکنش ۱ روی سطح زیرلایه باهم ترکیب شده‌اند و محصول به‌دست‌آمده حاوی گازهای CO_2، N_2 و H_2O فراوان است که خروج این گازها در زمان کوتاه، خلل‌وفرج‌های فراوانی روی سطح از

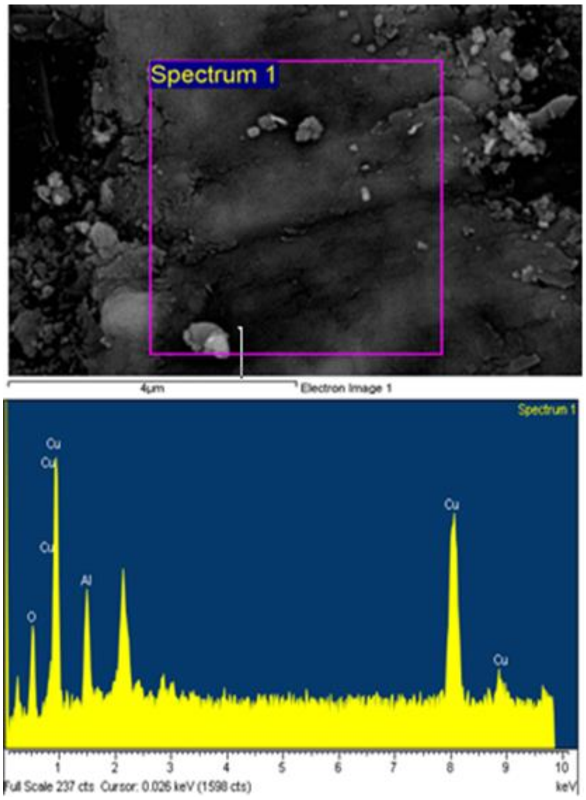
خود برجا می‌گذارد. با فراتررفتن نسبت سوخت به اکسیدکننده به بالاتر از نسبت استوکیومتری، میزان خروج گازها در هنگام سنتز بیشتر نیز می‌شود [15,17]. همان‌طور که شکل (٤) نشان می‌دهد، سطح پوشش تشکیل‌شده به این روش حاوی تخلل فراوانی است که باتوجه‌به نسبت ۱/۲۵ برای سوخت به اکسیدکننده قابل تفسیر است.



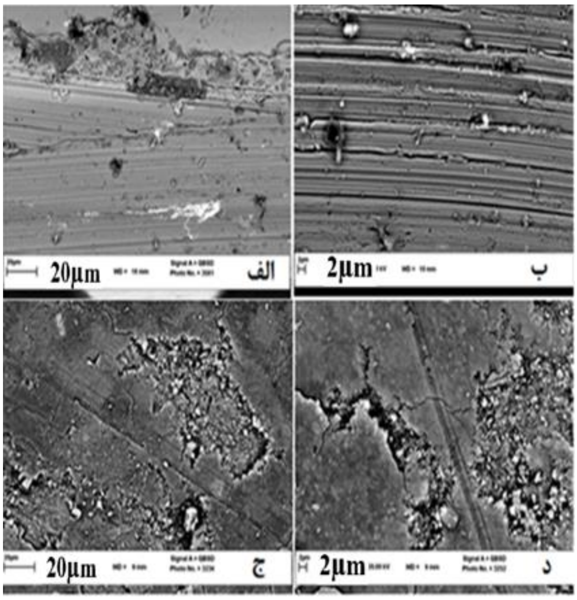
شکل ٤ میکروساختار حاصل از نمونهٔ پوشش‌داده‌شده با نسبت سوخت به اکسیدکنندهٔ ۱/۲۵ و ۲۵ درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا

شکل (۵) آنالیز EDS از نمونهٔ پوشش‌داده‌شده را نشان می‌دهد. حضور پیک مربوط به مس، آلومینیم و اکسیژن مربوط به فازهای تشکیل‌شده مس و آلومیناست.

قابل ذکر است پیک شناسایی‌شده که علامت ندارد، به عنصر پلاتین مربوط است که ناشی از پوشش مربوط به آماده‌سازی برای تصویربرداری با SEM است. شکل (٦- الف و ب) مربوط به سطح نمونهٔ بدون پوشش در بزرگ‌نمایی‌های ۲۰۰۰ و ۵۰۰۰ برابراست و شکل (٦- ج و د) مربوط به سطح نمونهٔ پوشش‌داده‌شده در همان بزرگ‌نمایی‌هاست.



شکل ۵ آنالیز EDS مربوط به نمونهٔ پوشش‌داده‌شده با نسبت سوخت به اکسیدکننده ۱/۲۵

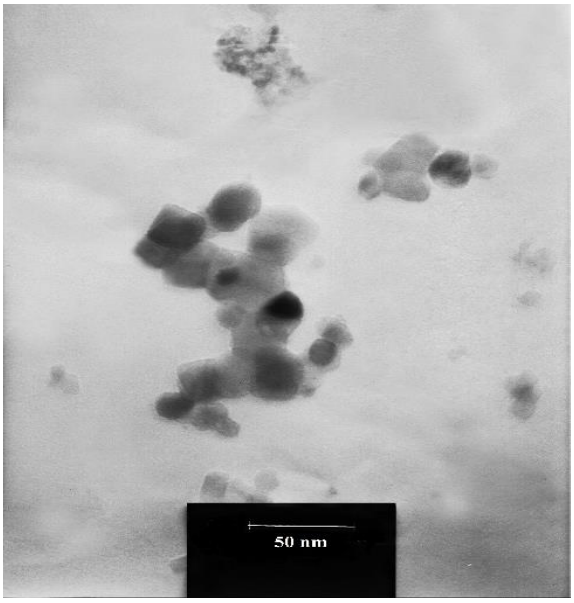


شکل ٦ میکروساختار مربوط به سطح نمونهٔ سایش قبل و پس از پوشش‌دهی، الف و ب: نمونهٔ بدون پوشش، ج و د: نمونهٔ پوشش‌داده‌شده

همان‌طور که از تصاویر بدون پوشش پیداست، سطح فلز پایه در اثر نیروی واردشده دچار تغییر شکل پلاستیک شدیدی شده و از طرفی دیگر بر اثر جداشدن لایه‌ها از سطح فلز پایه و کشیده‌شدن این ذرات روی سطح، سطح حاوی خراش‌های عمیقی است. این درحالی است که در سطح نمونه‌های پوشش‌داده‌شده مقدار و عمق خراش‌ها کاهش چشمگیری یافته است. از طرفی دیگر، منحنی‌های شکل (۳) هم رشد حدودا ٤ برابری مقاومت به سایش را در مقایسه با نمونهٔ بدون پوشش نشان می‌دهد.

نتایج تصاویر SEM گرفته‌شده بعد از تست سایش نمونهٔ پوشش‌داده‌شده و همچنین شکل (۳) همه نشان از تأثیر مثبت فاز تقویت‌کننده آلومینا در پوشش نشسته شده است. برای اندازه‌گیری اندازهٔ ذرات آلومینای سنتزشده از میکروسکوپ الکترونی عبوری استفاده شد. شکل (۷) تصویر TEM نانوذرات آلومینا را پس از انحلال محصول سنتز در اسیدنیتریک نشان می‌دهد.

همان‌طور که از تصویر TEM پیداست، ابعاد ذرات آلومینای سنتزشده زیر ۲۰ نانومتر هستند. این مسئله به‌دلیل سرعت بالای انجام سنتز احتراقی در محلول و کم‌بودن زمان ماندگاری در دمای بالاست که سبب شده است محصول زمان لازم را برای رشد نداشته باشد. از طرفی دیگر خروج میزان زیادی گاز مانع از زینترشدن ذرات سنتزشده می‌شود. باتوجه‌به ابعاد ذرات آلومینای به‌دست‌آمده از تصاویر TEM می‌توان پوشش تولیدشده را نانوکامپوزیت نامید. تولید ذرات آلومینا با چنین ابعادی یکی از عوامل ارتقای خواص سایشی پوشش نانوکامپوزیت سنتزشده است.



شکل ۷ تصویر TEM گرفته‌شده از نانوذرات آلومینا

نتیجه‌گیری

باتوجه‌به آزمایش‌ها و نتایج می‌توان موارد زیر را بیان کرد:

۱. بالاترین دمای پوشش‌دهی و مقاومت به سایش در نسبت ۲۵درصد وزنی فاز تقویت‌کنندهٔ آلومینا به‌دست آمد.

۲. بهترین نتیجه، افزایش ٤برابری مقاومت به سایش سطح پوشش‌داده‌شده را نسبت به فلز پایه نشان داد.

۳. پوشش نانوکامپوزیتی مس‌آلومینای تشکیل‌شده به‌روش سنتز احتراقی در محلول در عین چسبندگی بالا حاوی خلل‌وفرج بسیاری است.

٤. این پوشش فقط با یک مرحله سنتز و در اتمسفر هوا روی زیرلایهٔ مسی قرار گرفت.

۵. اندازهٔ ذرات فاز سرامیکی آلومینای سنتزشده در این تحقیق زیر ۲۰ نانومتر بود.

مراجع

1. Tasbihi, M., Kamila, Kočí., M., Troppová, I., Edelmannová, M., Reli, M., Capek, L., and Schomäcker, R.," Photocatalytic reduction of carbon dioxide over Cu/TiO_2 photocatalysts", *Environmental Science and Pollution Research*, Vol. 25, pp. 34903–34911, (2018).
2. Morshed, M., Titan, C. P., and Khan, J., "Effect of Cu-Al_2O_3 nanocomposite coating on flow boiling performance of a microchannel", *Applied Thermal Engineering*, Vol. 51, pp. 1135-1143, (2013).

3. Khzouz, M., Joe Wood, J., Bruno Pollet, B., and Waldemar Bujalski, W., "Characterization and activity test of commercial Ni/Al_2O_3, Cu/ZnO/Al_2O_3 and prepared NieCu/Al_2O_3 catalysts for hydrogen production from methane and methanol fuels", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, pp.1664-1675, (2013).
4. Ozbay, N., Yargic, A., and Sahin, R., "Tailoring Cu/Al_2O_3 catalysts for the catalytic pyrolysis of tomato waste", *Journal of the Energy Institute*, Vol. 91, pp. 424-433, (2018).
5. Afkham, Y., Azari, Khosroshahi, R., Kheirifard, R., Taherzadeh Mousavian, R., and Brabazon, D., "Microstructure and Morphological Study of Ball-Milled Metal Matrix Nanocomposites", *Physics of Metals and Metallography*, Vol. 118, pp. 790-800, (2017).
6. Jabłońska, M., Wolkenar, B., Beale, A., Pischinger, S., and Palkovits, R., "Comparison of Cu-Mg-Al-O_x and Cu/Al_2O_3 in selective catalytic oxidation of ammonia (NH_3-SCO)", *Catalysis Communications*, Vol. 105, pp. 5-9, (2018).
7. Ivanova,. T., Harizanova, A., Koutzarova, T., and Vertruyen, B., "Study of sol-gel Cu-doped Al_2O_3 thin films: structural and optical properties", *Journal of Physics: Conference Series*, Vol. 514, pp. 1-6, (2018).
8. Mukasyan, A., and Dinka, P., "Novel Approaches to Solution–Combustion Synthesis of Nanomaterials", *International Journal of Self-Propagating High-Temperature Synthesis*, Vol. 16, pp. 23–35, (2007).
9. Ranga, G., Mishra, B., and Sahu, R., "Synthesis of CuO, Cu and CuNi alloy particles by solution combustion using carbohydrazide and N-tertiarybutoxy-carbonylpiperazine fuels", *Materials Letters*, Vol 58, pp. 3523-3527, (2004).
10. Mukasyan, A. S., and Dinka, P., "Novel Method for Synthesis4 of Nano-Materials: Combustion of Active Impregnated Layers", *Advanced Engineering Materials*, DOI: 10.10002, (2007).
11. González-Cortés, S. L., and Imbert, F. E., "Fundamentals, properties and applications of solid catalysts prepared by solution combustion synthesis (SCS)", *Applied Catalysis A*, Vol. 452, pp. 117-131, (2013).
12. Nasiri, H., Vahdati Khaki., J., and Zebarjad, S. M., "One-step fabrication of Cu–Al_2O_3 nanocomposite via solution combustion synthesis route", *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, pp. 5305-5308, (2011).
13. Jain, S. R., and Adiga, K. C., "A New Approach to Thermochemical Calculations of Condensed Fuel-Oxidizer Mixtures". *Combustion and Flame*, Vol. 40, pp. 71-79, (1981).
14. Fathy, A., and El-Kady, O., "Thermal expansion and thermal conductivity characteristics of Cu–Al_2O_3 Nanocomposites", *Materials and Design*, Vol. 46, pp. 355–359, (2013).
15. H. Nasiri, H., Vahdati Khaki, J., and Shahtahmassebi, N., "Effect of alumina percentage on size and superparamagnetic properties of Ni-Al_2O_3 nanocomposite synthesized by solution combustion ", *Materials and Design*, Vol. 109, pp.476–484, (2016).
16. Nasiri, H., Bahrami Motlagh, E., VahdatiKhaki, J., and Zebarjad, S. M., "Role of fuel/oxidizer ratio on the synthesis conditions of Cu-Al_2O_3 nanocomposite prepared through solution combustion synthesis", *Materials Research Bulletin*, Vol. 47, pp. 3676–3680, (2012).

17. Xanthopoulou, G., Thoda, O., Roslyakov, S., Steinman, A., Kovalev, D., Levashov, E., Vekinis, G., Sytschev, A., and Chroneos, A., "Solution combustion synthesis of nano-catalysts with a hierarchical structure ", *Journal of Catalysis*, Vol. 364, pp. 112–124, (2018).